

0722631-1

КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи



ГАЛЯУТДИНОВ Марат Ильдарханович

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЁТ
КРЫЛОВЫХ ПРОФИЛЕЙ ВБЛИЗИ ЭКРАНА**

(01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

КАЗАНЬ – 2001

Работа выполнена в Отделе гидромеханики Научно-исследовательского института математики и механики им. Н.Г. Чеботарева Казанского государственного университета.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
профессор Д.В. Маклаков

Официальные оппоненты:

**НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА
КФУ**



заслуженный деятель науки России и Татарстана, доктор физико-математических наук, профессор Н.Б. Ильинский,

доктор физико-математических наук,
профессор Н.Д. Якимов

Ведущая организация:

Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева

Защита диссертации состоится « 21 » июня 2001 г.
в 14 час. 30 минут в ауд. физ.2 на заседании диссертационного совета Д 212.081.11 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по механике при Казанском государственном университете по адресу: 420008, Казань. ул. Кремлевская, 18, КГУ.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке им. Н.И. Лобачевского Казанского государственного университета.

Автореферат разослан « 19 » мая 2001г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

А.А. Саченков

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Одной из важных современных научно-технических проблем является создание надежных и экономичных скоростных транспортных средств. Необходимость решения этой проблемы продиктована многими важными народнохозяйственными задачами, в частности, задачами освоения труднодоступных районов Сибири, Дальнего Востока и Крайнего Севера. Среди возможных путей решения названной проблемы значительное внимание специалистов уделяется положительному эффекту опорной поверхности при движении несущих систем в воздухе над твердой или жидкой границей. Процесс проектирования аппаратов, использующих этот эффект, называемых «экранопланами», требует решения большого количества специфических проблем. К ним, в частности, относится проблема выбора сечения крыла (крылового профиля) экраноплана, позволяющего наиболее полно использовать преимущества экранного эффекта. Для рационального проектирования крылового профиля экраноплана, также как и любых других крыловых профилей, необходимо объединение решений прямой и обратной краевых задач, позволяющее последовательно проводить коррекцию формы профиля и распределения скорости на нем.

Цель диссертационной работы состоит в развитии численно-аналитических методов решения прямых и обратных краевых задач для профилей крыльев экранопланов; составление вычислительных алгоритмов и их численная реализация; проведение числовых расчетов; анализ влияния характеристик выдуваемой щелевой струи на аэродинамические характеристики крыловых профилей экранопланов.

Научная новизна результатов. Разработаны численно-аналитические методы решения прямой и обратной краевых задач для профилей крыльев экранопланов. При построении квазирешения обратной краевой задачи аэрогидродинамики (ОКЗА) в двухсвязной области удалось преодолеть трудности, связанные с нелинейностью условий разрешимости, введением модифицированной управляющей функции и так же, как при проектировании одиночного профиля в безграничном потоке, получить явное аналитическое решение. При решении прямой краевой задачи применен метод, состоящий в использовании в качестве искомой функции распределения скорости вдоль экрана, а не поверхности профиля. При этом граничное условие непротекания профиля удовлетворяется автоматически.

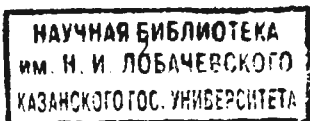
Обоснованность и достоверность полученных результатов обеспечиваются применением строгих математических методов при построении решений, комплексом мер по проведению внутренних проверок точности вычислений, сравнением с результатами других авторов.

Практическая ценность. Разработанные в диссертации методы и полученные результаты могут быть использованы при проектировании и расчете аэродинамических характеристик крыловых профилей использующих эффект близости земли, в частности, для проектирования и расчета профилей экранопланов и для изучения режимов взлета и посадки самолетов. Разработанные методы позволяют также проводить проектирование и расчет аэродинамических характеристик крыловых профилей с выдувом реактивной струи на верхнюю поверхность профиля, как для случая безграничного потока, так и для случая наличия экрана.

Апробация работы. Результаты диссертации по мере их получения были доложены на итоговых научных конференциях Казанского государственного университета за 1993–2001 гг., Всероссийской научно-технической конференции "Экраноплан – 94" (Казань, 1994), на III и IV Международных научно-технических конференциях «Механика машиностроения» (Набережные Челны, 1995, 1997), на Международном симпозиуме по гидродинамике судна, посвященном 85-летию со дня рождения А.М. Басина (С.-Петербург, 1995), на Международной научно-технической конференции "Экраноплан – 96" (Казань, 1996), на Всероссийской научной конференции «Краевые задачи и их приложения» (Казань, 1999), на Международной научной конференции «Актуальные проблемы математики и механики», посвященной 40-летию механико-математического факультета КГУ, на Международной научной конференции «Краевые задачи аэрогидромеханики и их приложения», посвященной 90-летию со дня рождения Г.Г. Тумашева (Казань, 2000), 11 и 12 научно-технических семинарах «Внутрикамерные процессы в энергетических установках, акустика, диагностика» (Казань, КФБАУ, 1999, 2000).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Главы диссертации разбиты на параграфы, общее число которых – десять. Объем диссертации составляет 133 страницы, содержит 61 рисунок. Список литературы насчитывает 107 наименований.



Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы и на основе анализа близких по тематике публикаций показано место данной работы в общем ряду исследований, посвященных проектированию и расчету крыловых профилей вблизи экрана; изложено содержание работы и сформулированы основные результаты, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации (§1–§3) посвящена решению ОКЗА проектирования крылового профиля, обтекаемого вблизи плоского экрана потоком идеальной несжимаемой жидкости (ИНЖ). Схема течения показана на рис. 1.

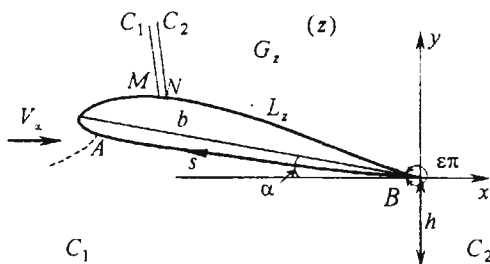


Рис. 1 Физическая область течения.

В §1 описана постановка задачи, ее аналитическое решение, квазирешение и записаны формулы определения аэродинамических характеристик. Искомый непроницаемый крыловой профиль AB с гладким контуром и одной острой кромкой B в плоскости $z = x + iy$ обтекается потоком вблизи прямолинейного твердого экрана со скоростью V_∞ на бесконечности, направленной параллельно экрану. Отстояние задней кромки профиля B от экрана равно h . На контуре профиля L_z задано распределение скорости потока $V(s)$ как функция отнесенной к хорде b дуговой абсциссы $s \in [0, L]$, где L – периметр контура L_z . Эта функция обращается в нуль в точке разветвления потока s_* и $V(0) = -V(L) = -V_*$.

По указанным исходным данным требуется определить форму крылового профиля и его аэродинамические характеристики.

При решении задачи используется классический подход, основанный на конформном отображении двухсвязной области течения на кольцо, которое отображается на внутренность прямоугольника $C_1 M N C_2$ в параметрической плоскости $u = \xi + i\eta$ (рис. 2).

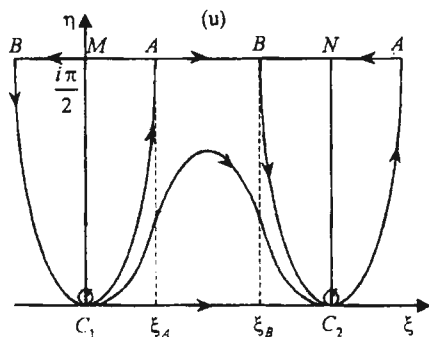


Рис.2 Параметрическая плоскость (u) .

Получено точное аналитическое решение задачи через эллиптические функции. Функция dw/du , имеющая нули первого порядка в точках A и B , запишется:

$$\frac{dw}{du}(u) = \varphi_0 [\wp(u) - \wp(\xi_A + \pi i/2)].$$

Функция $dz/du(u)$, отображающую область D_u на область D_z , запишется в виде:

$$\frac{dz}{du}(u) = \frac{\exp(-X^*(u) - F(u) - F_1(u))}{V_\infty} \cdot \frac{dw}{du}(u),$$

где периодические функции F и F_1 «вбирают» особенности функции $dw/dz(u)$.

Из решения смешанной краевой задачи (1), (2)

$$\operatorname{Re} X^* \Big|_{MN} = \ln \frac{V}{V_\infty} (s(\xi)) - \operatorname{Re} [F(\xi + \pi i/2) + F_1(\xi + \pi i/2)], \quad (1)$$

$$\operatorname{Im} X^* \Big|_{C_1 C_2} = 0, \quad (2)$$

найдем, что

$$X^*(u) = \frac{1}{\pi} \int_0^{L_1} v^*(\xi) Q(u - \xi) d\xi, \quad \text{где } Q(u) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{1}{\operatorname{ch}(u + kL_2)}.$$

При построении квазирешения задачи предложено использовать модифицированную управляющую функцию $\exp(-X^*(u))$, где $X^*(u)$ – это функция $X(u) = \ln \frac{dw}{V_\infty dz}(u)$ с «исключенными» особенностями функции

$dw/dz(u)$ в точках A и B , вместо $X^*(u)$ или $\operatorname{Re}(X^*(u))$, как это делалось для односвязных областей¹, в результате чего, удалось получить линейные условия разрешимости.

В §2 диссертации приведены решения модельных задач обтекания кругового цилиндра единичного радиуса вблизи прямолинейного твердого экрана с результатами численных расчетов, полностью согласующимися с результатами, полученными при решении задачи из §1.

В §3 диссертации представлены результаты численных расчетов. Рассмотрен пример влияния экрана на форму профиля и его аэродинамические характеристики. Приведен пример контура профиля и распределения скорости на нем (рис.3), полученного в результате численных экспериментов, состоящих в целенаправленной модификации распределения скорости на профиле Жуковского в безграничном потоке.

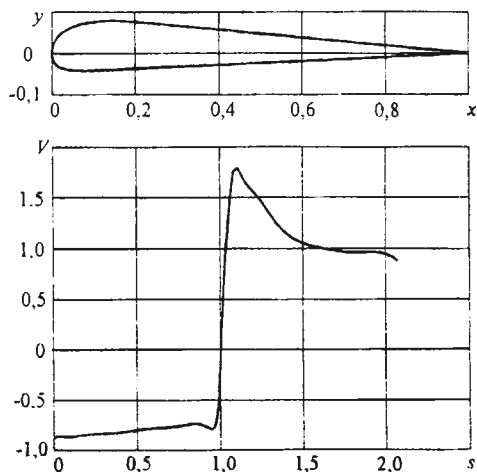


Рис.3 Спроектированный профиль и распределение скорости на нем для угла атаки $\alpha = 5^\circ$.

Данный профиль имеет простую геометрию, 12,02% толщины, обтекается безотрывно вблизи экрана при углах атаки $0^\circ \leq \alpha \leq 5^\circ$ и имеет максимальный экраный эффект (отношение C_y/C_y^∞) равный 1,33 при $C_y^\infty = 0,619$,

¹ Елизаров А.М., Ильинский Н.Б., Поташев А.В. Обратные краевые задачи аэродинамики. М.: Наука, 1984. 440с.

$\alpha = 5^\circ$ и $h = 0,1b$, где C_y – коэффициент подъемной силы, C_y^∞ – значение C_y при $h \rightarrow \infty$, b – хорда профиля.

Вторая глава диссертации (§4–§6) посвящена решению прямой краевой задачи о движении профиля произвольной формы в потоке ИНЖ вблизи плоского экрана. Данной задачей занимались многие ученые: Рождественский К.В., Панченков А.Н., Ефремов И.И., Лукашик Е.П., Горелов Д.Н., Горлов С.И. и другие. В данной работе при решении задачи применяется подход, основанный на введении фиктивного потока под экраном, что в отличие от метода зеркального отображения профиля относительно экрана², также как и в работе Ильинского А.Н., Ильинского Н.Б., Маклакова Д.В., Поташева А.В. (1995), позволяет перейти к односвязной области. Схема течения показана на рис.4. Оригинальность метода решения состоит в использовании в качестве искомой функции распределения скорости вдоль экрана, а не поверхности профиля. При этом граничное условие непротекания профиля удовлетворяется автоматически.

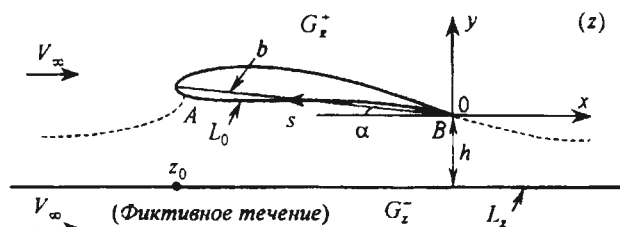


Рис.4 Физическая область течения.

В §4 диссертации описана постановка задачи изложен метод ее решения. В физической плоскости $z = x + iy$ профиль L_0 движется поступательно в идеальной несжимаемой жидкости над твердым прямолинейным экраном L_z . Линия L_z делит комплексную плоскость z на две части G_z^+ и G_z^- . Линия L_z является линией тока. Давление при переходе через неё изменяется непрерывно, а скорость терпит скачок.

Требуется рассчитать распределение давлений на контуре профиля и найти его аэродинамические характеристики.

Предположим, что в плоскости z под экраном также имеется поток ИНЖ, движущийся равномерно со скоростью V_∞ . Тогда в области $G_z = G_z^+ \cup G_z^-$ функция $w(z)$ будет уже не аналитической, а кусочно-

² Седов Л.И. Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики. М.: Наука, 1966. 448с.

аналитической функцией, терпящей разрыв на экране L_z , причем на нижней стороне линии L_z выполняется условие $dw^-/dz = V_\infty$, где w^\pm – нижнее и верхнее граничные значения функции $w(z)$ при подходе к L_z . Соотношение $dw/dz = V_\infty$ справедливо и внутри области G_z^- .

Пусть $z = f(t)$ – конформное отображение внешности единичного круга в параметрической плоскости $t = \xi + i\eta$ на внешность профиля, такое, что $f(\infty) = \infty$, $f(1) = 0$ (рис.5).

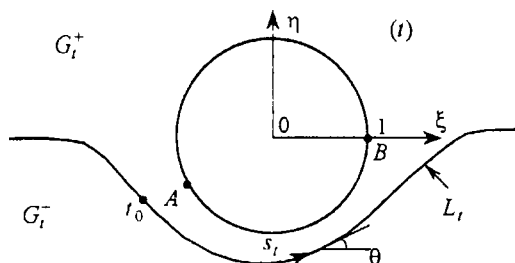


Рис.5 Параметрическая плоскость (t) .

Экрану L_z в плоскости t будет соответствовать линия L_t , проходящая через точку $t_0 = \xi_0 + i\eta_0 = f^{-1}(z_0)$, $z_0 = -1 - ih$, а областям G_z^+ и G_z^- – области G_t^+ и G_t^- соответственно.

Будем искать кусочно-аналитическую в области G_t функцию dw/dt , терпящую разрыв на линии L_t . Функция dw/dt должна удовлетворять условию непротекания профиля, которое в параметрической плоскости t имеет вид

$$\operatorname{Re} \left(t \frac{dw}{dt} \right) = 0 \quad \text{для } |t| = 1.$$

Введем функцию скачка $dw/dt(t)$ на линии L_t :

$$f(t) = \mu(s_t) \exp(-i\theta(s_t)) = \frac{dw^+}{dt}(t) - \frac{dw^-}{dt}(t),$$

где s_t – дуговая абсцисса образа экрана в плоскости t , отсчитываемая от фиксированной точки t_0 . Аргумент $\theta(s_t)$ функции $f(t)$ известен ввиду определенности линии L_t . Тогда на L_t можно определить

$$u(s_t) = t_0 + \int_0^{s_t} \exp(i\theta(\xi)) d\xi.$$

После преобразований получим следующее уравнение для определения на линии L , искомой функции $\mu(s_t)$:

$$V_\infty \left(\frac{dz}{dt}(t) - \frac{t^2 \exp(-2i\theta_\infty) - 1}{t^2 \exp(-2i\theta_\infty)} \frac{dz}{dt}(\infty) \right) = \frac{1}{2\pi i} \left[I(\mu|t) + \frac{1}{t^2} \overline{I(\mu|1/\bar{t})} - \right. \\ \left. - \frac{1}{t} (I(\mu|1) + \overline{I(\mu|1)}) \right] + \frac{2iV_\infty K \sin \theta_\infty}{t} - \frac{1}{2} \mu(s_t) \exp(-2i\theta(s_t)), \quad (3)$$

где
$$I(\mu|t) = \int_{L_t} \frac{\mu(s_t) ds_t}{u(s_t) - t}; \quad \frac{dz}{dt}(\infty) = K \exp(-i\theta_\infty).$$

В §5 диссертации записаны формулы вычисления аэродинамических характеристик и приведены результаты числовых расчетов. Для численного решения интегрального уравнения (3) использовался метод комплексных граничных элементов³. Проведен расчет профиля, изображенного на рис.3 при различных отстояниях от экрана h и углах атаки α . Расчеты показали, что с приближением к экрану экранный эффект может как увеличиваться, так и уменьшаться (для малых углов атаки ($\alpha = 2^\circ$) наблюдается эффект «притягивания» профиля к экрану). Положительное влияние экрана наблюдается при малых отстояниях профиля от экрана $h = 0,1 \div 0,5 b$ ($\alpha = 4^\circ; 6^\circ; 8^\circ$) (рис.6).

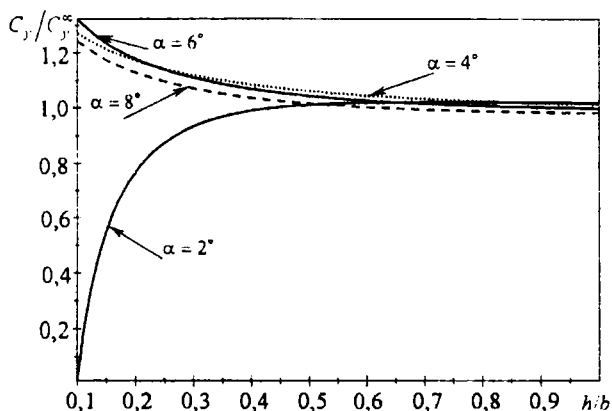


Рис.6 Зависимость экранного эффекта от отстояния от экрана.

В §6 диссертации описаны расчеты крылового профиля с учетом вязкости жидкости в рамках модели пограничного слоя (ПС) методом Эпплера⁴. Обтекание профиля полагается безотрывным и происходящим при больших, порядка 10^6 , числах Рейнольдса. Для того чтобы эта модель при обтекании профиля вблизи экрана была справедливой необходимо, чтобы толщина вытеснения δ^* на нижней стороне профиля была много меньше отстояния профиля от экрана. В проведенных расчетах было получено, что значение δ^* составляет от 1% до 10% величины h .

Эффективным способом повышения несущих свойств профиля является тангенциальный выдув струи на поверхность отклоненного закрылка. Такой метод может быть использован, например, для улучшения взлетно-посадочных характеристик летательных аппаратов. В экспериментальной работе Н.Г. Жулева и С.И. Иншакова (1996) была предложена новая схема, заключающаяся в тангенциальном выдуве струи на верхнюю поверхность профиля. ОКЗА по этой схеме решена Д.Ф. Абзалиловым и Н.Б. Ильинским (1999).

В третьей и четвертой главах диссертации (§7–§10) с использованием этой схемы решаются прямые краевые задачи движения профиля произвольной формы в потоке ИНЖ с выдувом реактивной струи через щель конечных размеров на верхней поверхности профиля в безграничном потоке (глава 3 §7–§8) и вблизи экрана (глава 4 §9–§10). Учет вязкости жидкости осуществлялся в рамках модели пограничного слоя по методу Эпплера.

Схема течения для случая наличия экрана показана на рис.7. При отсутствии экрана l_{3z} картина течения будет соответствовать случаю безграничного потока.

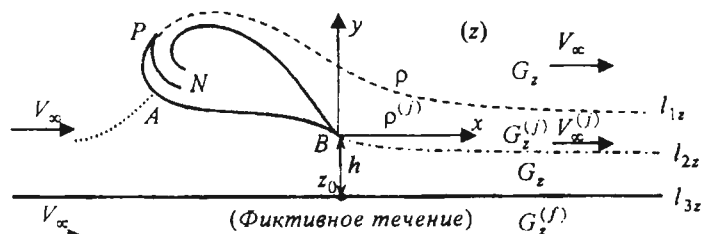


Рис. 7 Физическая область течения.

³ Громадка Т., Лей Ч. Комплексный метод граничных элементов. – М.: Мир, 1990.

⁴ Eppler R. Airfoil design and data. Springer-Verlag Berlin. Heidelberg. 1990. 512p.

В §7 диссертации даны постановка задачи и сведение ее к системе интегральных уравнений. Профиль L_0 заданной формы движется поступательно в идеальной несжимаемой жидкости с постоянной скоростью. На поверхности профиля имеется щель, асимптотически переходящая в бесконечнолиственный круговой канал внутреннего радиуса R_s и толщиной h_s . Из щели выдувается струя идеальной несжимаемой жидкости с плотностью $\rho^{(j)}$ и скоростью $V_\infty^{(j)}$ на бесконечности. В точках B и P схода потока внутренних к области течения угол принят равным 2π .

Требуется найти форму линий раздела, распределение скорости по поверхности профиля и его аэродинамические характеристики.

Из условий непрерывности давления при переходе через линии раздела l_{1z} и l_{2z} и интеграла Бернулли найдём, что:

$$\gamma \frac{V^2}{V_\infty^2} - \frac{V^{(j)2}}{V_\infty^{(j)2}} = \gamma - 1, \quad \gamma = \frac{\rho V_\infty^2}{\rho^{(j)} V_\infty^{(j)2}},$$

где V и $V^{(j)}$ – граничные значения скорости при подходе к линиям l_{1z} и l_{2z} из областей G_z и $G_z^{(j)}$ соответственно, параметр γ – отношение скоростных напоров в потоках на бесконечности.

Введём параметрическую плоскость (t) . Вид параметрической плоскости для случая наличия экрана показан на рис.8. Для взаимно однозначного конформного отображения областей G_z и G_t предполагаем соответствие бесконечно удаленных точек плоскостей (z) и (t) , а также переход точки $z = 0$ в точку $t = 1$.

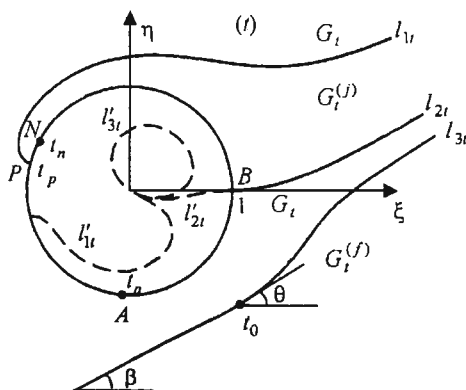


Рис.8 Параметрическая плоскость (t) .

Производную отображающей функции будем искать в виде

$$\frac{dz}{dt} = K \exp(-i\beta) \left(1 - \frac{1}{t}\right) \left(1 - \frac{t_p}{t}\right) \left(1 - \frac{t_n}{t}\right)^{\frac{a}{\pi}-1} \exp(-X_0(t)), \quad (4)$$

где $K = \left| \frac{dz}{dt}(\infty) \right|$, $X_0(t)$ – аналитическая во внешности круга функция, такая, что $X_0(\infty) = 0$; $t_p = \exp(i\gamma_p)$, $t_n = \exp(i\gamma_n)$, $a = \ln(R_s/(R_s + h_s))$. Параметры K и β выбираются так, чтобы профиль имел заданную (единичную) хорду и был расположен под заданным углом атаки.

Построение функции (4) для профиля заданной формы со щелью представляет собой самостоятельную задачу. В данной главе диссертации мы будем строить профиль со щелью путем модификации производной функции, конформно отображающей внешность профиля Жуковского на внешность круга:

$$dz/dt = K_g \exp(-i\beta) (1 - 1/t) \exp(-X_g(t)).$$

Комплексно-сопряженная скорость в плоскости (t) может быть представлена в виде⁵

$$\frac{dw}{dt} = \left\{ K V_\infty, t \in G_t \right\} \exp(-i\beta) f_0(t) \exp(-X(t)), \quad (5)$$

где
$$f_0(t) = \left(1 - \frac{t_a}{t}\right) \left(1 - \frac{1}{t}\right) \left(1 - \frac{t_p}{t}\right) \left(1 - \frac{t_n}{t}\right)^{-1}, \quad t_a = \exp(i\gamma_a).$$

Пусть l_{1u} и l_{2u} – линии соответствующие линиям раздела l_{1z} и l_{2z} в параметрической плоскости, а s_1, s_2 – дуговые абсциссы линий l_{1u}, l_{2u} , отсчитываемые от точек t_p и t_n соответственно. Будем искать углы наклона касательных $\theta_1(s_1), \theta_2(s_2)$ кривых l_{1u}, l_{2u} . Тогда

$$u_1(s_1) = t_p + \int_0^{s_1} \exp(i\theta_1(\xi)) d\xi \text{ для } l_{1u}, \quad u_2(s_2) = 1 + \int_0^{s_2} \exp(i\theta_2(\xi)) d\xi \text{ для } l_{2u}.$$

Запишем краевые условия для их определения $X(t)$ и γ_a из соотношения (5).

$$X(\infty) = 0 \text{ (условие на бесконечности)}, \quad (6)$$

⁵ Маклаков Д.В. Нелинейные задачи гидродинамики потенциальных течений с неизвестными границами. – М.: Янус-К, 1997. – 280 с.

$$\operatorname{Im}[X(u_k(s_k)) - X^{(j)}(u_k(s_k))] = 0, \quad k = 1, 2 \quad (l_{1u}, l_{2u} - \text{линии тока}), \quad (7)$$

$$\theta_k(s_k) = \beta - \operatorname{Im}[\ln f_0(u_k(s_k))] + \operatorname{Im}[X(u_k(s_k))], \quad k = 1, 2 \quad (\text{линии тока}), \quad (8)$$

$$\lambda_k(s_k) = X(u_k(s_k)) - X^{(j)}(u_k(s_k)) = \ln \left[\frac{1-\gamma}{2} T + \sqrt{\left(\frac{1-\gamma}{2} T \right)^2 + \gamma} \right], \quad k = 1, 2, \quad (9)$$

где $T = \left| \frac{dz/dt(u_k(s_k))}{K f_0(u_k(s_k))} \right|^2 \exp(X(u_k(s_k)) + X^{(j)}(u_k(s_k)))$ (непрерывность давления), $X(u_k(s_k))$, $X^{(j)}(u_k(s_k))$ – граничные значения функции $X(u_k)$ при подходе к линиям l_{1t} и l_{2t} из областей G_t и $G_t^{(j)}$ соответственно,

$$\gamma_a = 2\delta - \gamma_p + \gamma_n + 2\beta + \pi, \quad \delta = \operatorname{Im} X(e^{i\gamma}) \quad (\text{непроницаемость профиля}). \quad (10)$$

Если предположить, что $\lambda_1(s_1)$, $\lambda_2(s_2)$, $\theta_1(s_1)$, $\theta_2(s_2)$ известны, то функцию $X(t)$ можно восстановить по условиям (6), (8), (10)⁶:

$$X(t) = \Phi_1(t) - \Phi_2(t), \quad (11)$$

$$\text{где} \quad \Phi_k(t) = G_k(t) + \overline{G_k(1/\bar{t})} - \overline{G_k(0)}, \quad k = 1, 2.$$

$$\text{Функции} \quad G_k(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{l_{ku}} \frac{\lambda_k(u) du}{u - t}, \quad k = 1, 2$$

есть интегралы типа Коши по контурам l_{1u} , l_{2u} с плотностями $\lambda_1(u)$, $\lambda_2(u)$, а черта означает комплексное сопряжение.

Функция $X(t)$ в виде (11) по построению удовлетворяет условиям (6), (7), (10). Для определения пяти неизвестных $\lambda_1(s_1)$, $\lambda_2(s_2)$, $\theta_1(s_1)$, $\theta_2(s_2)$ и γ_a система уравнений (8–10) решалась методом прямых итераций. Для разрешения задачи интегрирования по бесконечной области линии раздела отображались внутрь круга и интегралы типа Коши вычислялись методом комплексных граничных элементов.

В §8 диссертации изложен алгоритм решения системы нелинейных уравнений и приведены результаты численных расчетов. Проведены расчеты модифицированных профилей Жуковского при различных значениях параметра искривленности профиля, параметров щели, значениях импульса выдуваемой струи C_I и углах атаки α . Проведенные расчеты показали, что при увеличении импульса выдуваемая струя в соответствии с эффектом Коанда распространяется вдоль поверхности профиля и продолжает

⁶ Мухелишвили Н.И. Сингулярные интегральные уравнения, М., 1968. 511с.

затем движение как струя в сносящем потоке. Вследствие этого происходит удлинение хорды профиля и смещение передней критической точки к задней кромке профиля с дальнейшим переходом ее ниже по потоку. В результате, предотвращается отрыв ПС даже при очень больших углах атаки, существенно увеличивается коэффициент подъемной силы (рис.9).

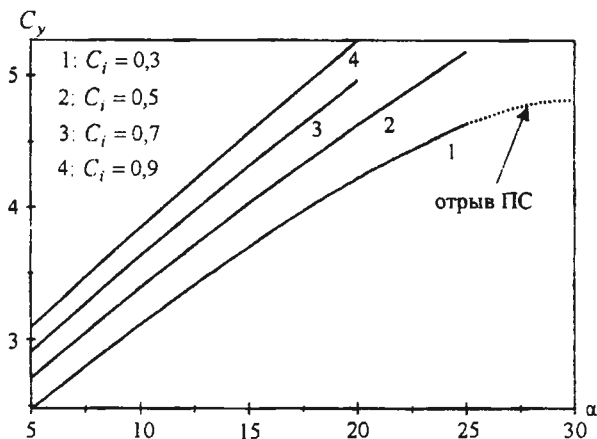


Рис.9 Зависимость $C_y(\alpha)$ для модифицированного профиля Жуковского с параметрами $H = 0,2, D = 0,2^7$, параметры щели $h_s = 0,01, R_s = 0,5, \gamma_n = 180^\circ$.

В §9 диссертации даны постановка задачи для случая наличия экрана и вывод интегральных уравнений. Аналогично методу решения задачи из второй главы, применяется подход основанный на введении фиктивного потока под экраном. Тогда условие постоянства скорости под экраном запишется в виде

$$\lambda_3(s_3) = X(u) - X^{(f)}(u) = 2 \ln \left| \frac{dz/dt(u)}{K f_0(u)} \right| + \operatorname{Re} [X(u) + X^{(f)}(u)], \quad u \in l_3, \quad (12)$$

где $X(u)$ и $X^{(f)}(u)$ – граничные значения функции $X(u)$ при подходе к экрану из областей G_i и $G_i^{(f)}$ соответственно, s_3 – дуговая абсцисса образа экрана в плоскости t , отсчитываемая от фиксированной точки $t_0 = f^{-1}(z_0)$, $z_0 = -ih$. Для определения шести неизвестных

⁷ Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Методы теории функций комплексного переменного. – 5-е изд. – М.: Наука, 1987. – 688 с.

$\lambda_1(s_1), \lambda_2(s_2), \lambda_3(s_3), \theta_1(s_1), \theta_2(s_2)$ и γ_a система уравнений (8) – (10), (12) решалась методом прямых итераций.

В §10 диссертации изложен алгоритм решения системы нелинейных уравнений и приведены результаты численных расчетов. На рис.10 а, б изображена картина обтекания модифицированного профиля Жуковского потоком ИНЖ для случаев безграничного потока на рис.10 а и наличия плоского экрана на рис.10 б при $h = 0,5 b$. Параметры профиля и щели равны $H = 0,2, D = 0,15, h_s = 0,01, R_s = 0,5, \gamma_n = 180^\circ$. При одинаковой силе выдува $C_I = 0,3$ и одинаковом довольно большом угле атаки $\alpha = 25^\circ$ для обоих случаев характер обтекания профиля является безотрывным, экранный эффект равен 1,45.

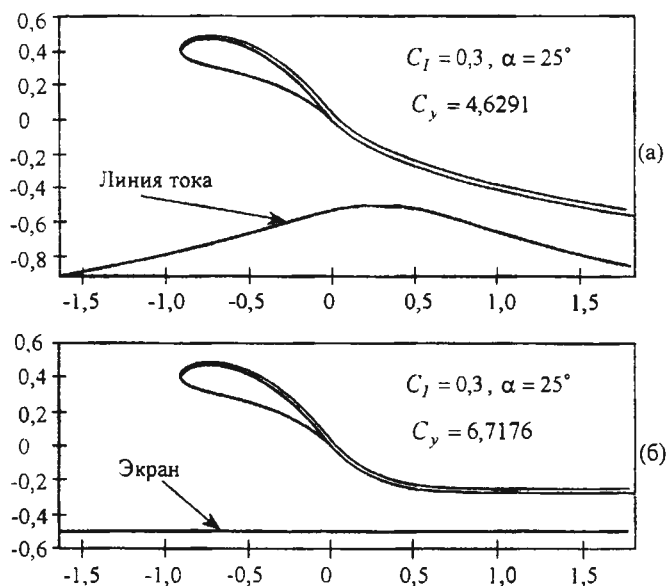


Рис. 10 а, б

Отмечено, что экран увеличивает положительное влияние выдува реактивной струи на аэродинамические характеристики профиля. При наличии выдува экранный эффект начинает проявляться при отстояниях от экрана сравнимых с хордой профиля (рис.11) (для замкнутого профиля эти значения на порядок меньше хорды (рис.6)), что положительно влияет на безопасность полета экраноплана.

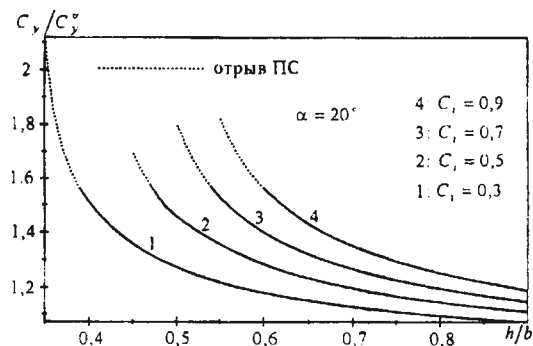


Рис.11 Зависимость экранного эффекта от отстояния от экрана для профиля с рис.10.

В заключении приведены основные результаты работы.

Основные результаты работы:

1. Решение ОКЗА для крыловых профилей, обтекаемых вблизи твердого экрана.
2. Численно-аналитический метод решения прямой задачи для крылового профиля, движущегося вблизи плоского экрана.
3. Решение прямой задачи для крылового профиля с выдувом реактивной струи.
4. Решение прямой задачи для крылового профиля, движущегося вблизи плоского экрана с выдувом реактивной струи.
5. Алгоритмы численной реализации решений задач, результаты числовых расчетов и сделанные на их основе выводы.

Список опубликованных работ по теме диссертации

1. Галаяутдинов М.И., Маклаков Д.В. Проектирование крыловых профилей, обтекаемых вблизи твердого экрана//Известия ВУЗов. Авиационная техника.– 1994.– № 3.– С. 3-7.
2. Галаяутдинов М.И., Маклаков Д.В. Проектирование крыловых профилей вблизи твердого экрана// Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции "Экраноплан – 94".– 30-31 августа 1994 г., Казань.– С.29.
3. Галаяутдинов М.И., Маклаков Д.В. Об одном обратном методе проектирования крыловых профилей экранопланов// Тезисы докладов международной научно-технической конференции "Механика Машиностроения" (ММ – 95), 28-30 марта 1995г. – Набережные Челны. 1995.– С.30.

4. *Галаяутдинов М.И., Маклаков Д.В.* Решение прямой и обратной задачи о движении крылового профиля вблизи экрана// Международный симпозиум по гидродинамике судна, посвященный 85-летию со дня рождения А.М. Басина. – С.-Петербург, 1995. – С.409.
5. *Галаяутдинов М.И., Маклаков Д.В.* Движение профиля произвольной формы вблизи экрана// Тезисы докладов Международной научно-технической конференции "Экраноплан-96". – 11-13 сентября 1996, Казань. – С.37.
6. *Галаяутдинов М.И., Маклаков Д.В.* Нелинейная задача обтекания профиля вблизи экрана// Тезисы докладов международной научно-технической конференции "Механика Машиностроения" 23-25 сентября 1997г. – Набережные Челны. 1997. – С.20.
7. *Галаяутдинов М.И., Маклаков Д.В.* Движение профиля крыла заданной формы с выдувом реактивной струи// Внутрикамерные процессы в энергетических установках, акустика, диагностика. Тез. докл. 11 науч.-тех. семинара. Казань: КФБАУ, 1999. – С.47.
8. *Галаяутдинов М.И., Маклаков Д.В.* Движение профиля крыла заданной формы с выдувом реактивной струи// Труды Математического центра им. Н.И. Лобачевского, 1999. Казань: Изд-во Унипресс. – Т.3. – С.120-125.
9. *Галаяутдинов М.И., Маклаков Д.В.* Движение крылового профиля вблизи плоского экрана// Известия ВУЗов. Авиационная техника. – 1999. – № 4. – С. 40-43.
10. *Галаяутдинов М.И., Маклаков Д.В.* Движение крылового профиля с выдувом реактивной струи вблизи плоского экрана// Труды Математического центра им. Н.И. Лобачевского, 1999. Казань: Изд-во Унипресс. – Т.7. – С. 71-80.
11. *Галаяутдинов М.И., Маклаков Д.В.* Движение профиля крыла вблизи твердого экрана с выдувом реактивной струи// Внутрикамерные процессы в энергетических установках, акустика, диагностика. Тез. докл. 12 науч.-тех. семинара. Казань: КФБАУ, 2000. С. 18–19.
12. *Галаяутдинов М.И., Маклаков Д.В.* Движение крылового профиля с выдувом реактивной струи // Известия ВУЗов. Авиационная техника. – 2000. – № 3. С. 20–23.

Часть результатов диссертации получена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 93-013-17552, 99-01-00169, 99-01-00173, 99-01-04029).

Отпечатано с готового оригинал-макета
в ООО «ДАС»

Лицензия № 0118 от 3.04.98.

Тираж 120 экз. Заказ 05/43. Формат 60х90 1/16.

Печать ризографическая.

420008, Казань, ул. Университетская, 17

Тел. 64-69-26

